

мутов сторон. В сетях, имеющих в одном ряду 20—25 треугольников, наиболее оптимальной будет схема, предусматривающая определение азимутов крайних связующих сторон. В этом случае сеть трилатерации окажется проложенной как бы между двумя азимутально-дальномерными ходами. Если в одном ряде сети будет больше чем 25 треугольников, то тогда азимутально-дальномерный ход следует проложить и через середину сети трилатерации. Точность азимутальных определений должна быть 0,"5—0,"7 при точности измерения линий порядка 1 : 100 000 ... 1 : 200 000. Для характеристики точности пунктов сети можно пользоваться данными таблиц, приведенных в статье. При этом имеющиеся в них сдвиги необходимо умножить на среднюю квадратическую погрешность измерения линий в сети. Например, если линии измеряют радиодальномером «Луч», средняя квадратическая погрешность измерения которым равна  $3 \text{ см} + 10^{-6} D$ , где  $D$  — длина измеряемой линии, то при средней длине сторон в сети, равной 12 км, средняя квадратическая погрешность измеренной линии равна 6,6 см. Если схема сети примерно совпадает с вариантом *Св. 1к*, то поперечные сдвиги наиболее слабых пунктов сети будут равны  $2,5 \times 6,6 = 16,5 \text{ см}$ .

**Список литературы:** 1. Бронштейн Г. С. К вопросу об оценке точности ряда трилатерации. — Инж.-строит. изыскания. М.: Стройиздат, 1974, № 1 (34). 2. Костецкая Я. М. Учет исходных дирекционных углов при оценке точности сетей трилатерации. — Труды конференции «50 лет ленинского декрета об учреждении ВГУ». Изд-во Львов. ун-та, 1970. 3. Костецкая Я. М. О влиянии твердых дирекционных углов сторон ряда трилатерации на точность положения пунктов. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1977, вып. 25. 4. Костецкая Я. М. К вопросу оценки точности сплошных сетей трилатерации. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1967, вып. 6. Костецкая Я. М., Герасимов Ю. В. О точности сетей трилатерации с исходными дирекционными углами. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка, 1982, вып. 35.

Статья поступила в редколлегию 11.05.82

УДК 63:528.4+631.67+633.18

А. В. МАКУШИН

### ОПТИМАЛЬНЫЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПИКЕТНЫМИ ТОЧКАМИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РИСОВЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При создании рисовых оросительных систем на стадии технических чертежей проектирование объемов планировочных работ производят по цифровой модели местности [2, 4], для получения которой применяют способ нивелирования поверхности по квадратам. Размер сетки квадратов при съемке для подсчета объемов планировочных работ при проектировании орошаемых площадей достаточно полно исследован Ю. Г. Батраковым [2]. Однако раз-

мер сетки квадратов при съемке рельефа для проектирования реконструкции рисовых оросительных систем не изучен и требует исследования.

Поскольку по данным нивелирования поверхности по квадратам производят вычисление объемов планировочных работ, то очевидна связь между точностью определения объемов планировочных работ и сторонами сетки квадратов.

Для исследования воспользуемся известной упрощенной формулой для вычисления объемов планировочных работ в пределах срезки (насыпи) по сетке квадратов

$$V = a^2 \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1)$$

где  $a$  — сторона квадрата при съемке;

$\sum_{i=1}^n h_i$  — сумма рабочих отметок центров тяжести квадратов в пределах срезки (насыпи);

$n$  — число квадратов в контуре срезки (насыпи).

Тогда средняя квадратическая погрешность вычисления объема земляных работ будет равна

$$m_V = a^4 \cdot \sum_{i=1}^n m_h^2. \quad (2)$$

Положив  $m_{h_1} = m_{h_2} = \dots = m_{h_n} = m_h$ , формулу (2) запишем в виде

$$m_V^2 = a^4 \cdot m_h \cdot n. \quad (3)$$

Основными погрешностями определения отметок точек и, следовательно, рабочих отметок при съемке являются:

$m_1$  — погрешности, обусловленные обобщением элементов мезо- и микрорельефа вследствие того, что пикеты не покрывают всей снимаемой площади;

$m_2$  — погрешности из-за влияния мельчайшего рельефа (за топографическую шероховатость);

$m_3$  — погрешности, возникшие вследствие геодезических действий.

Таким образом, средняя квадратическая погрешность определения рабочей отметки при съемке будет равна

$$m_h = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2}. \quad (4)$$

Точность съемки равнинного рельефа для составления проектов вертикальной планировки аэродромов и орошаемых площадей достаточно полно освещена в работах [2, 3, 5]. Однако вопрос точности съемки рельефа рисовых чеков в период реконструкции требует дополнительного изучения, поскольку поверхность чека имеет некоторые особенности. По сравнению с другими формами



равнинного рельефа поверхности рисовых чеков имеют слабо выраженный мельчайший рельеф и небольшую топографическую шероховатость, так как они ежегодно выравниваются длиннобазовыми планировщиками и один раз в три—пять лет подвергаются ремонтной планировке.

С целью определения численных значений погрешностей  $m_1$  и  $m_2$  нами было выполнено нивелирование пяти рисовых чеков общей площадью 20 га по сетке квадратов 5 на 5 м. Обработка материалов производилась по методике, изложенной в работах [2, 3, 5].

В результате математической обработки было получено корреляционное уравнение, определяющее связь между сторонами квадратов при съемке и величиной погрешности обобщения рельефа

$$m_1 = 0,06a + 1, \text{ см}, \quad (5)$$

где  $a$  — сторона квадрата при съемке в метрах.

Средняя квадратическая погрешность за топографическую шероховатость для тех же чеков с общим числом точек  $n = 3479$  получилась равной  $m_2 = 1,3$  см.

Следует отметить, что для большинства топографических поверхностей равнинного рельефа, как следует из работ [2, 3, 5], погрешности  $m_1$  и  $m_2$  значительно больше.

В работе Н. Н. Александрова и др. [1] приводится расчет точности определения превышений. Руководствуясь этой работой и учитывая, что съемка поверхности чека выполняется горизонтальным лучом зрения нивелиром при расстояниях до 150 м, получим  $m_3 = 1,0$  см.

Подставляя найденные значения погрешностей в формулу (4), после несложных преобразований получим

$$m_n = 0,01(0,06 \cdot a + 1,5), \text{ м}. \quad (6)$$

С учетом (6) уравнение (3) примет вид:

$$m_V^2 = 1 \cdot 10^{-4} \cdot (0,06 \cdot a + 1,5)^2 \cdot a^4 \cdot n. \quad (7)$$

На практике, как правило, площадь чека в контуре срезки равна половине всей площади чека. Тогда замечаем, что

$$P_q = 2 \cdot a^2 \cdot n, \quad (8)$$

где  $P_q$  — площадь чека в м<sup>2</sup>.

Принимая во внимание (8), уравнение (7) примет вид:

$$m_V^2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot P_q \cdot (0,06 \cdot a + 1,5)^2 \cdot a^2$$

или

$$m_V^2 = 0,5 \cdot P_q \cdot (0,06 \cdot a + 1,5)^2 \cdot a^2, \quad (9)$$

где  $P_q$  в га.

Переходя к относительной погрешности, получим

$$m_{V, \text{от.}} = \frac{0,05 \cdot P_q (0,06 \cdot a + 1,5)^2 \cdot a^2}{V^2}. \quad (10)$$

Раскрывая скобки и группируя члены по степеням  $a^i$ , получим

$$a^4 + 50 \cdot a^3 + 625 \cdot a^2 - \frac{2}{P_q} \left( \frac{V \cdot m_{V, \text{от.}}}{0,06} \right) = 0. \quad (11)$$

Решая уравнение (11), после некоторых преобразований будем иметь

$$a_p = 12,5 \left( \sqrt{0,06 \frac{V \cdot m_{V, \text{от.}}}{V P_q} + 1} - 1 \right). \quad (12)$$

Объем земляных работ можно представить уравнением

$$V = V_{\text{уд.}} \cdot P_q, \quad (13)$$

где  $V_{\text{уд.}}$  — удельный объем земляных работ.

С учетом равенства (13) уравнение (12) примет вид

$$a_p = 12,5 \left( \sqrt{0,06 \cdot V_{\text{уд.}} \sqrt{P_q} \cdot m_{V, \text{от.}} + 1} - 1 \right). \quad (14)$$

По результатам проведенных нами исследований в Крымской области оптимальная площадь чека, соответствующая минимуму общих затрат, составляет 5,5 га. Принимая площадь чека равной  $p_q = 5,5$  га и подставляя это значение в (14), получим

$$a_p = 12,5 \left( \sqrt{0,14 \cdot V_{\text{уд.}} \cdot m_{V, \text{от.}} + 1} - 1 \right). \quad (15)$$

Анализируя выражение (15), замечаем, что расстояния между никетными точками при съемке поверхности рисового поля с целью проектирования реконструкции рисовой оросительной системы обусловлены точностью съемки, погрешностью определения земляных работ и удельным объемом земляных работ, т. е. характером рельефа.

Положим

$$m_{V, \text{от.}} \leq m_u, \quad (16)$$

где  $m_u$  — допустимая относительная средняя квадратическая погрешность, которая устанавливается на основе требований потребителя к точности подсчета планировочных работ.

С учетом (16) равенство (15) в предельном случае примет вид

$$a_p = 12,5 \left( \sqrt{0,14 \cdot V_{\text{уд.}} \cdot m_u + 1} - 1 \right). \quad (17)$$

Анализ производственных материалов, проведенный нами для рисовых оросительных систем Крыма и Кубани, показывает, что удельный объем земляных работ при реконструкции рисовых систем находится в пределах от 500 до 1000 м<sup>3</sup>/га.

Принимая  $m_u = 0,05$ , получим при  $V_{\text{уд.}} = 500$  м<sup>3</sup>/га  $a_p = 14,0$  м; при  $V_{\text{уд.}} = 1000$  м<sup>3</sup>/га  $a_p = 22,9$  м. Тогда стандартные стороны квадратов при съемке, определяемые как ближайшие к расчетным, будут соответственно равны 15 и 20 м.

Таким образом, оптимальные стороны сетки квадратов при нивелировании поверхности рисового поля для проектирования реконструкции рисовой оросительной системы должны составлять 15 или 20 м в зависимости от характера рельефа.



Список литературы: 1. Александров Н. Н. и др. Расчеты точности топографических съемок в районах орошения. — М.: Геодезиздат, 1956. 2. Батраков Ю. Г. Исследование точности съемки рельефа для составления проектов вертикальной планировки орошаемых площадей / Труды Московского ин-та инженеров землеустройства, 1959, вып. 3. 3. Большаков В. Д. Обобщение рельефа при съемках в крупных масштабах (1:2000, 1:10 000, 1:500) / Труды Московского ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1958, вып. 33. 4. Видуев Н. Г., Гржибовский В. П. Геодезическое проектирование вертикальной планировки. — М.: Недра, 1964. 5. Скиданенко К. К. Исследование точности съемки аэродромного рельефа и определения объемов земляных масс по квадратам. — Л., 1951.

Статья поступила в редколлегию 29.10.81

УДК 629.783: [528.2+528.344]

А. Н. МАРЧЕНКО

## О ДИНАМИЧЕСКОМ МЕТОДЕ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

Значительное увеличение в последнее время точности наблюдений искусственных спутников Земли (ИСЗ) привело к постановке и решению ряда новых задач в теоретической и практической областях космической геодезии. В рамках динамического метода — это необходимость использования экономически выгодных численных методов интегрирования уравнений движения ИСЗ, которые по сравнению с аналитическими имеют меньшие методические погрешности и дают за счет этого более точные результаты [14]. Последнее влечет за собой поиск более удобных с точки зрения численных методов форм описания геопотенциала и, как следствие, — решение проблемы математически однородного представления как длинноволновой, так и коротковолновой структуры гравитационного потенциала  $V$  планеты.

Предварительные исследования показали, что нормальный потенциал  $U$ , например, в виде суммы шаровых функций нулевого и второго порядков может быть очень точно описан [7] суммой потенциалов одной центральной точечной массы, величина которой равна массе Земли и четырехточечных масс приближенной конструкции квадриполя

$$U = \sum_{i=1}^5 m_i' \frac{1}{r_i}, \quad (1)$$

лежащих на главных осях  $A$  и  $C$  инерции планеты. Для возмущающего потенциала  $T=V-U$  справедлива сколь угодно точная аппроксимация [1, 4] равномерно сходящимся рядом

$$T = \sum_{i=1}^{\infty} m_i^* \frac{1}{r_i} \quad (2)$$

потенциалов  $\frac{m_i^*}{r_i}$  точечных масс  $m_i^*$ , расположенных на некоторой

поверхности  $\sigma$ , лежащей внутри сферы Бьерхаммара. Значит, с учетом (1), (2) возможно математически однородное представление  $V$  в форме

$$V = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{m_i}{r_i}, \quad (3)$$

где  $r_i$  — расстояние от точечной массы  $m_i$  до текущей точки. В выражениях (1)–(3) точечные массы  $m_i'$ ,  $m_i^*$  и  $m_i$  соответственно описывают нормальный  $U$ , возмущающий  $T$  и гравитационный потенциал  $V=U+T$  планеты, а системы функций  $\left\{ \frac{1}{r_i} \right\}$  в

(1)–(3) предполагаются одинаковыми (т. е. для (1), (2), (3) координаты соответствующих индексу  $i$  точечных масс равны). Причем на основании (1) из  $T=V-U$  следует, что  $m_i^*=0$  при  $i=1, 2, \dots, 5$ , а  $m_i'=0$  для  $5 \leq i \leq \infty$  и, тогда в общем случае  $m_i = m_i' + m_i^*$ .

Использование (3) позволяет успешно решать вопрос детализации гравитационного поля по мере поступления новой измерительной информации, без пересчета определенных ранее параметров многоточечной модели путем добавления отдельных точечных масс. Кроме того, при прогнозировании положений ИСЗ методами численного интегрирования уравнений движения применение (3) — взамен классического ряда по шаровым функциям — значительно сокращает [12] время вычислений на ЭВМ.

Несмотря на имеющийся недостаток описания (3), который заключается в определенной сложности \* нахождения параметров точечных масс по сравнению с определением стоксовых постоянных  $S_{nm}$ ,  $S_{nm}$ , в данной работе задача изложения динамического метода космической геодезии поставлена именно с применением описания (3) вместо разложения геопотенциала по сферическим гармоникам, поскольку его преимущества (отмеченные выше) весьма существенны. При этом основной упор делался на последующее использование численных методов спутниковой геодезии.

Для получения устойчивых решений в качестве основы для построения соответствующего алгоритма определения величин  $m_i$  точечных масс из наблюдений ИСЗ взят метод регуляризации А. Н. Тихонова [9] решения некорректных задач.

Будем исходить из возможной трактовки [13] каждого спутникового наблюдения  $l$  (например, топоцентрической дальности и т. п.) как нелинейного функционала  $S$  вида

$$S = S(\tilde{X}, V), \quad (4)$$

\* Отмечаемый факт связан как с неортогональностью базисной системы функций  $\left\{ \frac{1}{r_i} \right\}$ , так и с неоднозначностью ее выбора [5].